

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

1. Поляризация диэлектриков. Спонтанная и индуцированная поляризация сегнетоэлектриков

В веществах, проводимость которых меньше, чем у металлов, под действием электрического поля появляется электрический момент, либо обусловленный смещением центров тяжести зарядов атомов или молекул, либо за счет ориентации собственных электрических дипольных моментов, которыми обладали молекулы до приложения электрического поля. Это явление носит название поляризации и характеризуется величиной поляризации \vec{P} :

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_i \vec{M}_i}{\Delta V}, \quad (1)$$

где \vec{M}_i – электрический дипольный момент i -й частицы, ΔV – элемент объема, в котором возник дипольный момент.

Суммарный дипольный момент зависит от числа поляризованных элементов

$$\vec{P} = n\vec{p}, \quad (2)$$

где \vec{p} – удельный дипольный момент частицы, n – концентрация частиц.

Вектор \vec{p} направлен от отрицательного к положительному заряду диполя. Смещение зарядов пропорционально полю.

$$\text{Тогда} \quad \vec{p} = \alpha \vec{E}, \quad \vec{P} = n\alpha \vec{E}, \quad (3)$$

где α – поляризуемость вещества.

Поляризация обеспечивает увеличение емкости вакуумного конденсатора при внесении в межэлектродное пространство диэлектрика.

Из курса общей физики известна связь между векторами поляризации и электрического смещения в вакууме и среде.

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \\ \vec{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \\ \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 \vec{E} = \vec{P}, \quad (5)$$

$$\chi = (\varepsilon - 1) = \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0 \vec{E}}. \quad (6)$$

χ – диэлектрическая восприимчивость, ε – диэлектрическая проницаемость вещества. Эти величины характеризуют поляризацию вещества в электрическом поле. Кроме того, ε характеризует макроскопическую поляризацию вещества, в то время как α характеризует микроскопическую поляризацию. Связь между ними устанавливает уравнение Клаузиуса - Мосотти:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{n}{3\varepsilon_0} \alpha. \quad (7)$$

Выражая ε из (7), можно получить, что ε стремится к бесконечности при $n\alpha = 3\varepsilon_0$. Это означает, что при определенном значении поляризуемости α диэлектрическая проницаемость вещества может достигать больших значений.

Из (5) следует, что появление поляризации \vec{P} обусловлено полем \vec{E} . Однако из (7) видно, что при определенных значениях $n\alpha$ возможна отличная от нуля поляризация и при $\vec{E}=0$.

Это так называемая спонтанная поляризация. Она обязана своим происхождением определенному расположению молекул или атомов, при котором возникают дипольный момент и локальное поле, которое, действуя на соседние области, приводит к дальнейшей ориентации соседних диполей так, что данная область становится зародышем общей поляризации. Вызываемая

таким зародышем поляризация всего объема является результатом расширяющейся причинно-следственной связи. Подчеркнем, что спонтанная поляризация связана со структурной перестройкой кристалла, которая может наступить в результате тепловых механических или каких-то случайных процессов неэлектрической природы в неустойчивых системах. Этим свойством обладают далеко не все вещества, а лишь некоторые. Эти вещества называются сегнетоэлектриками или активными диэлектриками с высоким значением диэлектрической проницаемости, величина которой может достигать нескольких десятков тысяч в отличие от простых диэлектриков, у которых ϵ в большинстве случаев не превышает 10 (рис. 1).

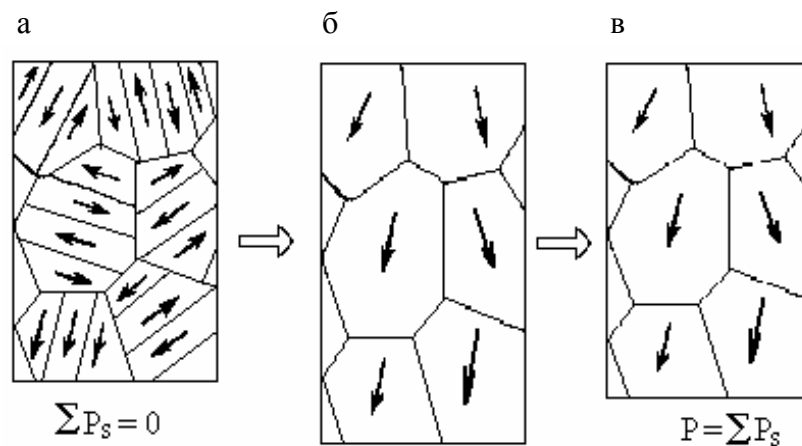


Рис. 1. Процесс поляризации сегнетоэлектриков BaTiO_3 . а - естественное состояние, б - приложено электрическое поле, в - остаточная поляризация после снятия электрического поля

Наряду с высокой диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрики обладают нелинейной зависимостью ϵ от электри-

ческого поля, которая известна, как гистерезис $D(E)$ или $P(E)$ (Рис. 2).

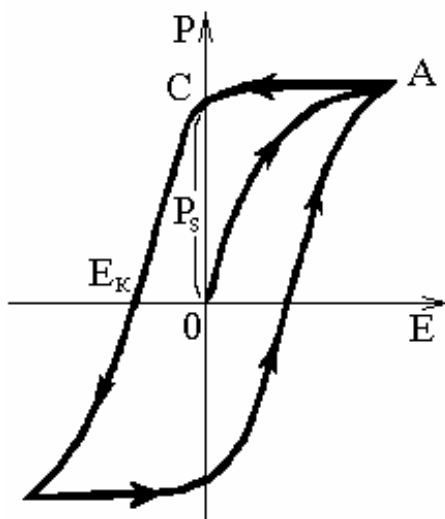


Рис. 2. Петля гистерезиса при поляризации переменным напряжением: P_s – максимальная спонтанная поляризация. E_k – коэрцитивная сила

Еще одной характерной особенностью сегнетоэлектриков является температурная зависимость электрической восприимчивости, известная как закон Кюри – Вейсса:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}. \quad (8)$$

Величина T_c называется температурой Кюри и является критической температурой изменения сегнетоэлектрических свойств. C называется постоянной Кюри и для разных веществ имеет свое значение.

В отличие от спонтанной, поляризация, обусловленная полем, носит название индуцированной, при этом, как следует из (5), зависимость поляризации от поля является линейной и харак-

теризуется независимостью макроскопического параметра ε от интенсивности электрического поля в несильных полях. Сегнето-

электрики обладают нелинейной зависимостью $D(E)$. Если разложить функцию $D(E)$ в ряд Тейлора и ограничиться конечными значениями диэлектрической проницаемости, то получим:

$$D = (D)_{E=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial^n D}{\partial E^n} \right)_{E=0} E^n, \quad (9)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_{E=0} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial^{n-1} D}{\partial E^{n-1}} \right)_{E=0} E^{n-1}. \quad (10)$$

Если можно пренебречь всеми членами разложения кроме первого, то $\varepsilon = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_{E=0} = \text{const}$. Эта величина определяет ε в отсутствие электрического поля, т.е. при спонтанной поляризации.

Пренебрегая вторым слагаемым разложения, запишем

$$D \approx D_0 + E \frac{\partial D}{\partial E} = D_0 + \varepsilon E. \quad (11)$$

$D(E)$ может быть представлена в виде кусочно-линейной аппроксимации, где D_0 определяется координатой точки пересечения с осью D касательной к кривой $D(E)$; $\frac{\partial D}{\partial E}$ - первая производная, принимаемая в пределах E_1 и E_2 рассматриваемого участка (рис. 3) постоянной.

$\frac{\partial D}{\partial E}$ - динамическая или дифференциальная проницаемость, значение которой является постоянной величиной только на определенном участке $E_1 < E < E_2$. Следует учесть, что нелинейность должна проявляться в сильных полях.

Изменение полной поляризации сегнетоэлектрика во внешнем поле складывается из двух процессов: роста индуцированной поляризации и изменения удельного веса областей, спонтанный

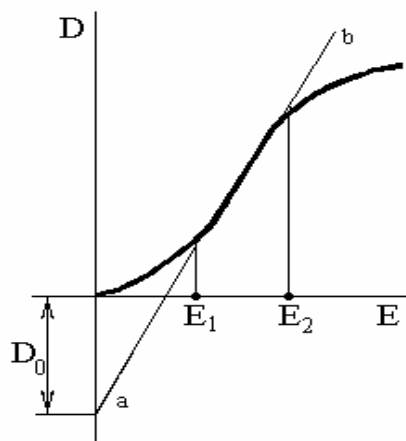


Рис. 3. Кусочно-линейная аппроксимация нелинейной среды на участке $E_1 < E < E_2$

дипольный момент которых ориентирован в направлении внешнего поля (рис.4). При этом электрическая индукция

$$D = \varepsilon_0 E_{\text{ср}} + (P_{\text{и}} + P_{\text{с}}), \quad (12)$$

где $E_{\text{ср}}$ – среднемакроскопическое поле в сегнетоэлектрике, $P_{\text{и}}$ – индуцированная поляризация, $P_{\text{с}}$ - спонтанная поляризация.

Полная диэлектрическая проницаемость диэлектрика

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E_{\text{ср}}} = 1 + \frac{P_{\text{и}} + P_{\text{с}}}{\varepsilon_0 E_{\text{ср}}} \quad (13)$$

На рис. 4 представлена гистерезисная зависимость поляризации в переменном поле.

При насыщении величины поляризации с ростом поля можно считать, что ориентация областей с различными направлениями спонтанного момента закончена и дальнейший линейный рост поляризации с увеличением напряженности поля осуществляется за счет возрастания индуцированной поляризации по формуле:

$$P_{и}=(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E \approx \varepsilon\varepsilon_0 E. \quad (14)$$

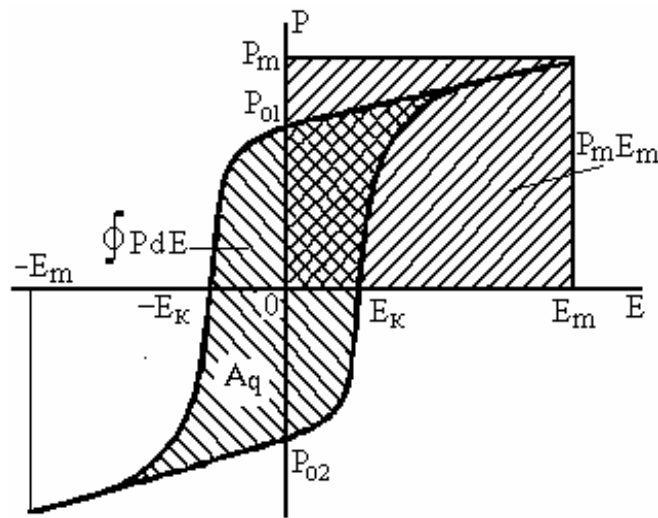


Рис. 4. Гистерезисные потери в сегнетоэлектрике (вольт-кулоновская характеристика): $P_0 \equiv P_c$ – спонтанная поляризация; $P_{и} = P_m - P_c$ – индуцированная поляризация, P_{01} , P_{02} – остаточная поляризация

На рис. 4 показано разделение обеих поляризаций экстраполяцией ветви насыщения петли гистерезиса к значению поля, равному нулю. Наклон ветви насыщения петли гистерезиса дает начальную диэлектрическую восприимчивость, которая определяется при измерении в слабом поле. Отрезок ординаты, отсекаемый продолжением ветви насыщения, дает спонтанную поляризацию P_c . Величина напряженности электрического поля, при которой остаточная поляризация $P_{01} = -P_{02}$ равна нулю, носит название коэрцитивной силы (E_k).

2. Экспериментальное наблюдение поляризации сегнето-электриков

Принципиальная схема осциллографирования петли гистерезиса приведена на рис. 5.

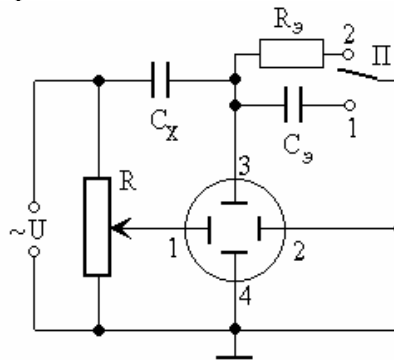


Рис. 5. Схема наблюдения петли гистерезиса на осциллографе: C_x – исследуемый конденсатор, $C_э$, $R_э$ – эталонные конденсатор и сопротивление, П – переключатель

На горизонтальные пластины осциллографа 1,2 подается с потенциометра R напряжение U , пропорциональное высокому входному напряжению. $C_x \ll C_э$, и можно считать, что напряжение, поданное на последовательно включенные конденсаторы, падает на C_x . На пластины 3,4 (вертикальная ось) подается напряжение $U_э$ с эталонного конденсатора. Для последовательно соединенных конденсаторов

$$C_x U_x = C_э U_э = q = \sigma S = P, \quad (15)$$

где q – заряд на конденсаторах, σ – поверхностная плотность заряда, S – площадь пластин.

$$C_x = \frac{C_э U_э}{U_x} = \frac{\epsilon_x \epsilon_0 S}{d} \quad \text{и} \quad \epsilon_x = \frac{C_э U_э}{\epsilon_0 S E}, \quad (16)$$

где $E = \frac{U_x}{d}$, d – толщина образца.

Используя выражение (14) и помня, что P численно равно σ , можно записать:

$$P = \frac{C_3 U_3}{S}, \quad \varepsilon_x = \frac{P}{\varepsilon_0 E}. \quad (17)$$

Отклонение луча по вертикали, таким образом, будет пропорционально U_3 , а следовательно, в определенных масштабах пропорционально q , P , D , а отклонение по горизонтали пропорционально U .

Сегнетоэлектрики, как и диэлектрики с нелинейными свойствами, широко используются в керамических конденсаторах, которые получили название варикондов за резко выраженную нелинейность $\varepsilon(E)$. Эквивалентную схему вариконда можно представить параллельно включенными идеализированным конденсатором без потерь C_3 и нелинейным сопротивлением R_3 , потери в котором имитируют активные потери в вариконде. При подаче на сегнетокерамику (вариконд) синусоидального напряжения $U=U_m \sin \omega t$ мгновенное значение тока через него будет:

$$i_m = C_3 \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R_3} = \omega C_3 U_m \cos \omega t + G_3 U_m \sin \omega t = A \cos \omega t + B \sin \omega t. \quad (18)$$

Приближенно значение емкости C_3 и проводимости $G_3 = R_3^{-1}$ можно найти по осциллограмме заряда и тока сегнетокерамики, включенной по схеме рис. 5. В положении переключателя «1» снимается зависимость $q(U)$, как было показано выше, а в «2» – на экране осциллографа наблюдается кривая $i(U)$ (рис.6). Вследствие диэлектрического гистерезиса обе кривые имеют вид петли.

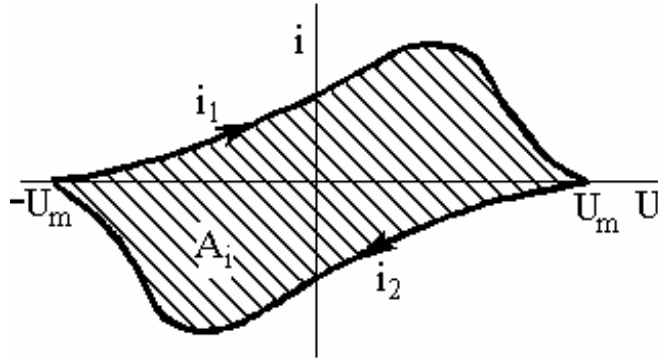


Рис.6. Вольт-амперная характеристика вариконда

Обозначим значения заряда и тока при увеличении напряжения через q_1, i_1 , а при уменьшении – через q_2, i_2 . Тогда

$$i_1 = \frac{dq_1}{dt} = \frac{dq_1}{dU} \frac{dU}{dt}; \quad i_2 = \frac{dq_2}{dt} = \frac{dq_2}{dU} \frac{dU}{dt}. \quad (19)$$

Делая разложение в ряд Фурье, можно найти коэффициенты разложения А и В:

$$\begin{aligned} A = G_9 U_m &= \frac{2}{T} \int_0^T i \sin \omega t dt = \frac{\omega}{\pi} \left(\int_0^{T/2} i_1 \sin \omega t dt + \right. \\ & \left. + \int_{T/2}^T i_2 \sin \omega t dt \right) = \frac{\omega}{\pi U_m} \left(\int_{-U_m}^{U_m} \frac{dq_1}{dU} U dU + \right. \\ & \left. + \int_{U_m}^{-U_m} \frac{dq_2}{dU} U dU \right) = \frac{\omega}{\pi U_m} \int_{-U_m}^{U_m} (q_2 - q_1) dU = \frac{\omega}{\pi U_m} A_q. \end{aligned} \quad (20)$$

$$B = \omega C_3 U_m = \frac{2}{T} \int_0^T i \cos \omega t dt = \frac{\omega}{\pi} \left(\int_0^{T/2} i_1 \cos \omega t dt + \right. \\ \left. + \int_{T/2}^T i_2 \cos \omega t dt \right) = \frac{U_m}{\pi U_m} \int_{-U_m}^{U_m} (i_1 - i_2) dU = \frac{A_i}{\pi U_m}. \quad (21)$$

$$G_3 = \frac{\omega A_q}{\pi U_m^2} \text{ и } C_3 = \frac{A_i}{\pi U_m^2 \omega}. \quad (22)$$

A_q и A_i находят по кривым гистерезиса заряда и тока (рис. 4,6) планиметрированием осциллограмм с учетом масштаба осей.

Диэлектрические потери сегнетоконденсатора обусловлены гистерезисом и за период T в единице объема V могут быть определены как

$$\text{tg} \delta = \frac{A}{2\pi W} = \frac{\oint q dU}{\pi q_m U_m} = \frac{\oint P dU}{\pi P_m E_m}, \quad (23)$$

где $A = \oint q dU$ - работа, затрачиваемая за период на переполяризацию конденсатора, q_m - максимальный заряд, U_m - максимальная амплитуда напряжения.

Максимальная энергия, запасенная плоским конденсатором, определяется как $W = \frac{q_m U_m}{2} = \frac{CU^2}{2}$. Величина потерь соответствует площади петли гистерезиса на экране осциллографа.

Следовательно, $\text{tg}\delta$ равен отношению площади петли гистерезиса $\oint P dE$ к площади прямоугольника $P_m E_m$, умноженной на π

(рис. 4). $\text{tg}\delta$ изменяется в зависимости от амплитуды поля, достигая максимума при $E_m \approx E_{\text{max}}$. Максимальные значения $\text{tg}\delta$ варикондов с сегнетоэлектриками достигают 0,1-0,5.

Значение $\oint P dE$ за один период можно получить планиметрированием гистерезисной кривой поляризации сегнетоэлектрика, и по (23) рассчитать $\text{tg}\delta$.

Принципиальная схема установки для снятия зависимости $P(E)$ и $i_p(E)$ приведена на рис. 7.

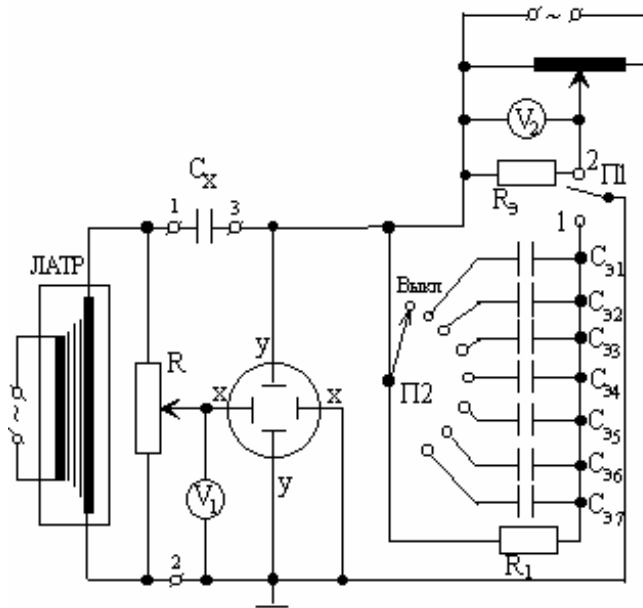


Рис. 7. Рабочая схема получения петель гистерезиса сегнетоэлектрика:
 R_3 – эталонное сопротивление (10 кОм),

R_1 – сопротивление (470 мОм), служащее для стекания заряда с пластин осциллографа (при расчетах не учитывается),
 C_x – исследуемый конденсатор,
 C_1 - C_7 – эталонные конденсаторы емкостью 0,1мкФ, 0,04мкФ, 0,03мкФ, 0,015мкФ, 5100пкФ, 2200пкФ, 1200пкФ соответственно.

Цель работы:

Познакомиться с поляризацией сегнетоэлектрика в электрическом поле, построить зависимость $P(E)$, определить диэлектрическую проницаемость, удельное сопротивление и тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика.

Порядок работы:

1. Получить кривую поляризации сегнетоэлектрика за один период (кривая гистерезиса) для различных величин поляризующего напряжения, используя схемы (рис. 5,7). Переключатель П – в положении «1» для снятия зависимости $q(U)$ или $P(U)$.

Получить на экране осциллографа семейство петель гистерезиса при выходных напряжениях ЛАТРа от 150 В до 50 В через 20 В.

Каждую петлю зарисовать на отдельную кальку, отмечая оси координат и масштаб по осям X и Y. Следует иметь в виду, что

масштаб по оси необходимо умножить на 2, т.к. напряжение U_x на входе осциллографа \sim в 2 раза меньше напряжения на сегнетоэлектрике из-за делителя (рис. 5,7) и $E = 2U_x/d$; $C_3 = C = 1200$ пФ.

2. В положении «2» переключателя П получить и зарисовать кривую тока $i(U)$ сегнетоэлектрика для одного из значений поляризующего напряжения.

3. Отградуировать оси осциллографа для определения E_{\max} и P_{\max} поляризационных кривых.

4. По вершинам петель гистерезиса определить максимальную поляризацию, используя формулы (16), (17), и построить графики $P = f(E)$ и $\varepsilon = f(E)$. Геометрические размеры исследуемого конденсатора указаны на держателе образца.

5. Определить P_o , P_i – индуцированную и P_c – спонтанную поляризации, коэрцитивную силу.

6. Взвешиванием или планиметрированием найти площади кривых гистерезиса поляризации и тока.

7. Используя формулы (20), (21), (22), (23), найти: c_3 , ε , P , ρ_{c3} и $\text{tg}\delta$. В числителе и знаменателе выражения для $\text{tg}\delta$ масштаб один и тот же (мм). Прделав вычисления для различных петель, получить зависимость $\text{tg}\delta = f(E)$.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под поляризацией диэлектриков?
2. В чем особенность поляризации сегнетоэлектриков и как она происходит?
3. Что собой представляет гистерезисная зависимость поляризации от приложенного поля?
4. Объясните схему для наблюдения петель гистерезиса.

5. Какими параметрами характеризуются диэлектрические сегнетоэлектрические материалы?

Рекомендуемая литература

1. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков. Киев: Вища школа, 1980. 392 с.
2. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
3. Борисова М. Э., Койков С. Н. Физика диэлектриков. Л.: Изд-во. ЛГУ, 1979. 239 с.
4. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. М.:ВШ, 1986. 367 с.
5. Тареев Б. М., Короткова Н. В., Петров В. М., Преображенский А. А. Электро-, радио-материалы. М.: ВШ, 1978. 335 с.
6. Кухаркин Е. С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика. М.: ВШ, 1982.520 с.